

# Comment mesurer et suivre l'évolution des stocks de Carbone Organique des Sols cultivés

Antoine BRASSET, Earthworm Foundation  
[a.brasset@earthworm.org](mailto:a.brasset@earthworm.org)

Annie DUPARQUE, Agri-Transfert Ressources et Territoires  
[a.duparque@agro-transfert-rt.org](mailto:a.duparque@agro-transfert-rt.org)



**Groupe FORBS COMIFER**  
**13 octobre 2021**



**Earthworm**



Projet « Sols Vivants »

<http://www.earthworm.org>



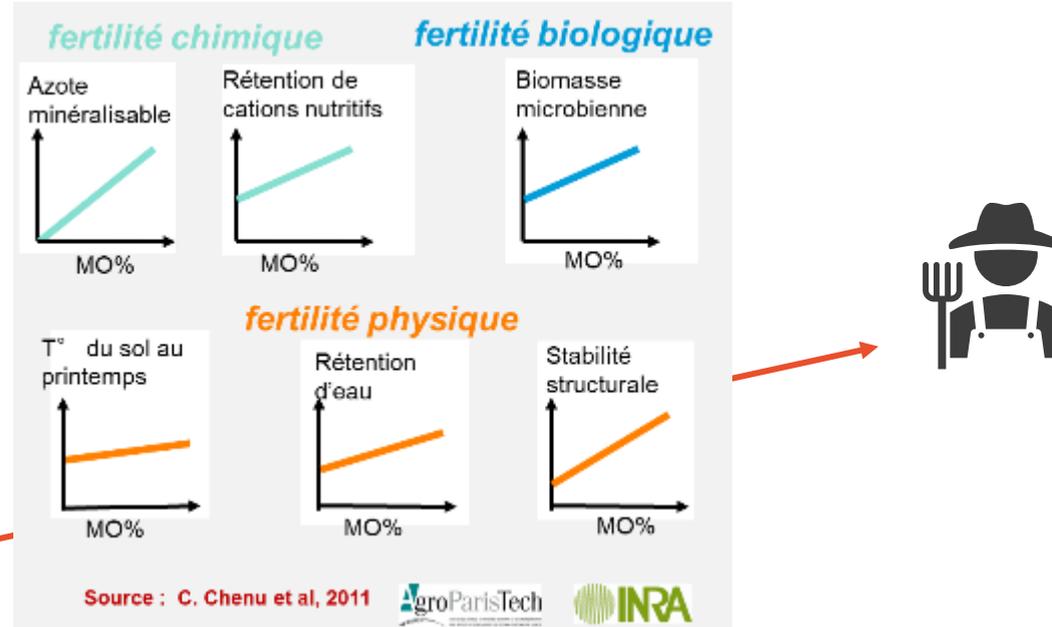
<http://www.agro-transfert-rt.org/>



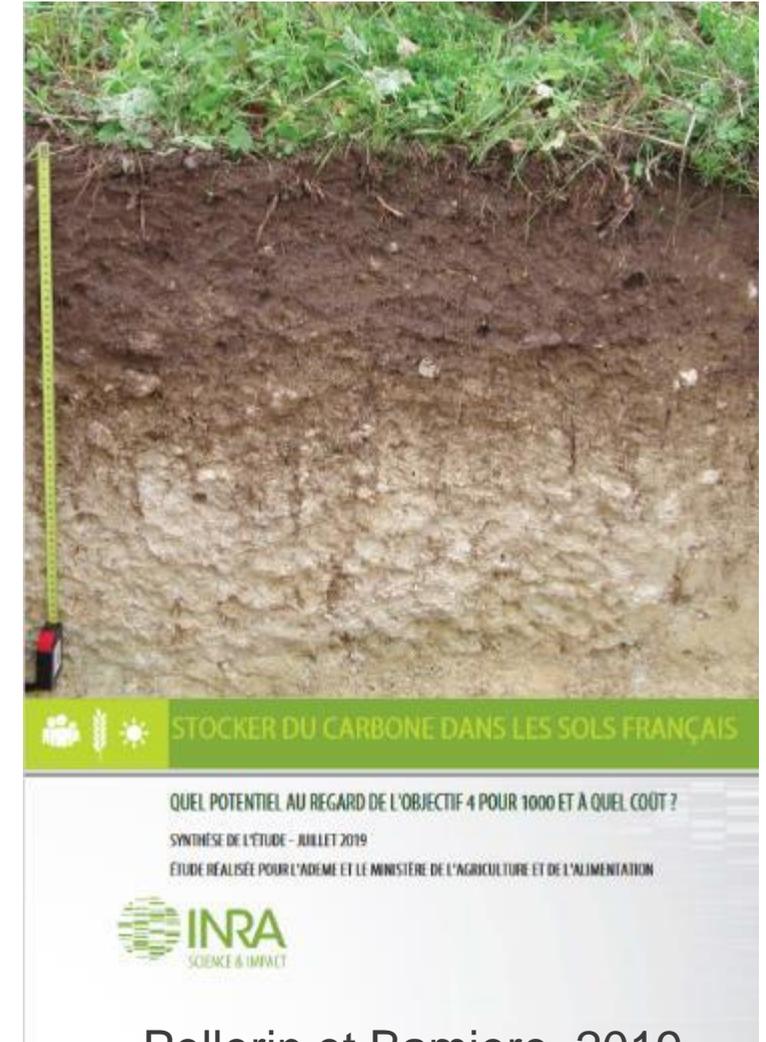


# Pourquoi s'intéresser au stock de COS

Raisons agronomiques



Raisons « environnementales »



Pellerin et Bamiere, 2019





- **Comment quantifier le stock de carbone organique au champ de façon fiable et accessible au conseiller ou à l'agriculteur ?**
- **Comment estimer sans biais majeur la dynamique d'évolution du carbone stocké dans les sols en fonction des pratiques des agriculteurs ?**



# Détermination du stock C initial

## Différentes conditions à remplir :

- Représentativité et bon indice Minimum Detectable Change (MDC)
- Comparaison dans le temps pertinente
- Protocole réalisable en routine
- Stock calculé sur 30 cm

## Evaluation of the Potential for Soil Organic Carbon Content Monitoring With Farmers

*Cédric Deluz<sup>1</sup>, Madlene Nussbaum<sup>2</sup>, Ophélie Sauzet<sup>1</sup>, Karine Gondret<sup>1</sup> and Pascal Boivin<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup> HEPIA Soils and Substrates, University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland, Geneva, Switzerland, <sup>2</sup> School of Agricultural, Forest and Food Sciences, Bern University of Applied Sciences, Zollikofen, Switzerland

## An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers

J. W. WENDT<sup>a</sup> & S. HAUSER<sup>b</sup>

<sup>a</sup>International Fertilizer Development Center, Nairobi, Kenya, and <sup>b</sup>International Institute of Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria





## 1<sup>ère</sup> question de travail

**Quel est l'impact de la méthode de prélèvement et du calcul de stock à masse équivalente sur la qualité de la détermination du stock de carbone à l'échelle de la parcelle agricole ?**

- Quelle influence exerce le pattern et le nombre de sous-échantillons ?
- Comment corriger les stocks à « masse équivalente » ?



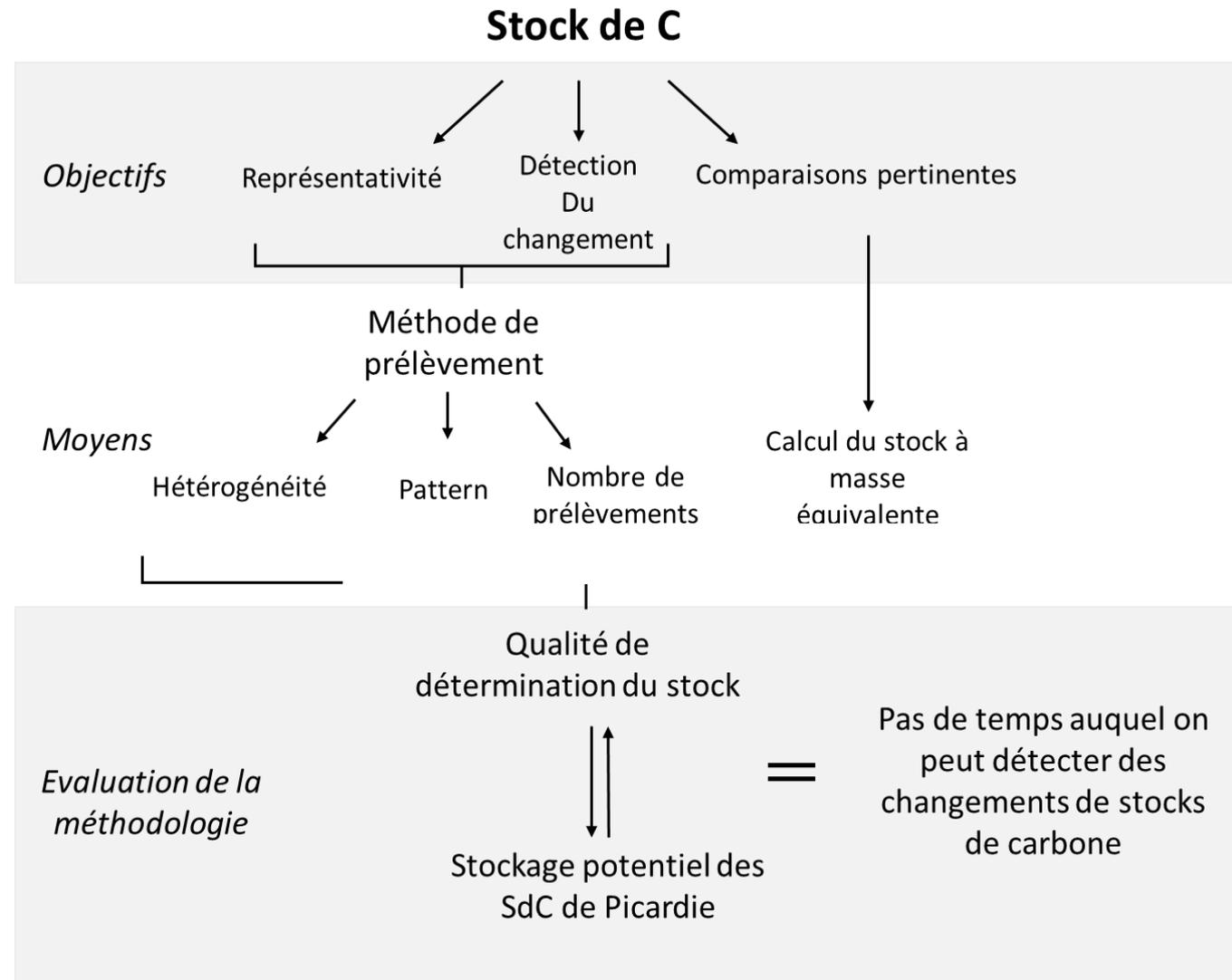
## 2<sup>nd</sup>e question de travail

### **Quel est le besoin de précision de la méthode de détermination du stock de carbone organique du sol ?**

- Quel est le pas de temps nécessaire pour observer une variation significative du stock de carbone ?
- Quelles sont les ordres de grandeur des variations de stock de carbone en situations agronomiques concrètes ?



# Démarche de travail





- Comment quantifier le stock de carbone organique au champ de façon fiable et accessible au conseiller ou à l'agriculteur ?
- Comment estimer sans biais majeur la dynamique d'évolution du carbone stocké dans les sols en fonction des pratiques des agriculteurs ?

### ***Les étapes***

- Quel « pattern » de prélèvement au sein d'une parcelle ?
- Echantillonner à « masse de terre équivalente » !
- Mettre en évidence l'effet des pratiques à moyen terme sur le Stock de COS

Comment mesurer et suivre l'évolution des stocks de Carbone Organique des Sols cultivés

## Quel « pattern » de prélèvement au sein d'une parcelle ?

Antoine BRASSET, Earthworm Foundation  
[a.brasset@earthworm.org](mailto:a.brasset@earthworm.org)

Annie DUPARQUE, Agri-Transfert Ressources et Territoires  
[a.duparque@agro-transfert-rt.org](mailto:a.duparque@agro-transfert-rt.org)



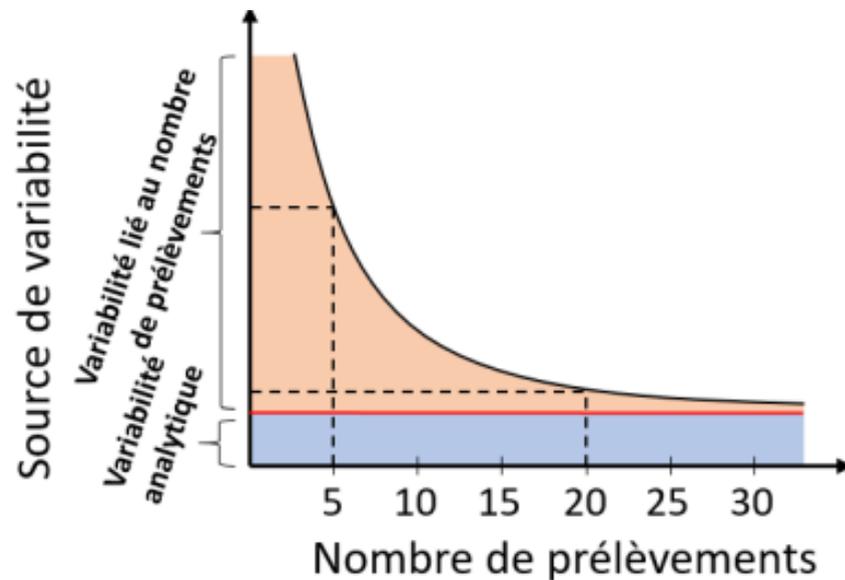
**Groupe FORBS COMIFER**  
**13 octobre 2021**

# Détermination du stock initial

## Répartition spatiale des prélèvements élémentaires

**Protocol P. Boivin (HES.SO)** inspiré de *Wendt et Hauser (2019)* :

- 1 échantillon composite par zone homogène (20 prélèvements)
- Utilisation d'une gouge
- Pattern en X



Évaluer la méthode  
d'échantillonnage dans le  
contexte des sols du Santerre



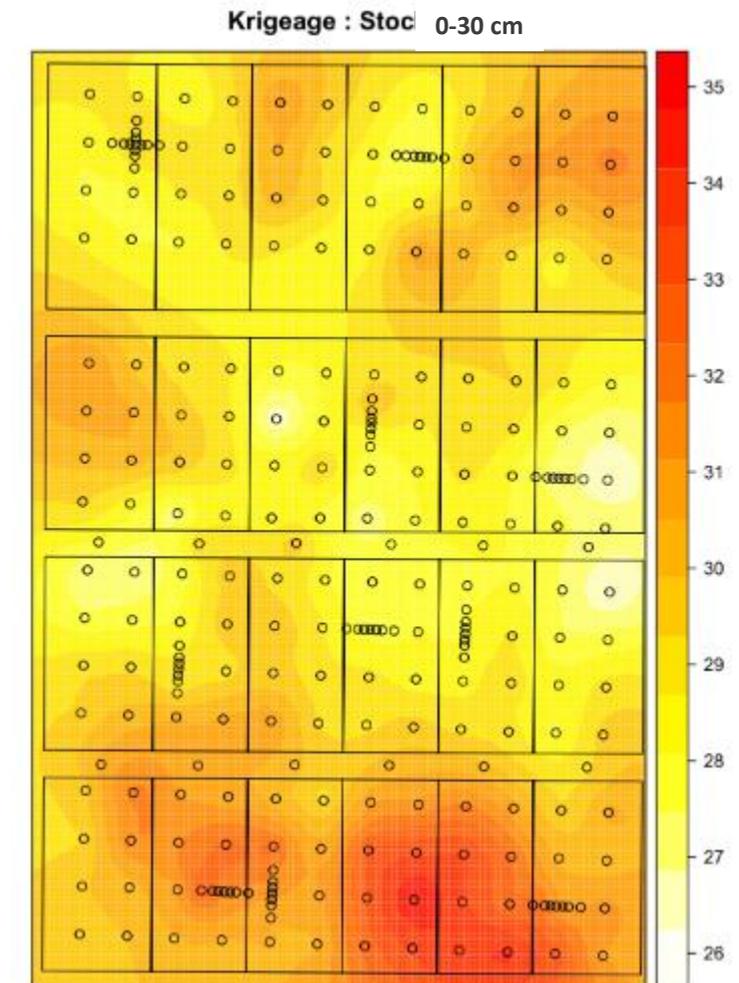


# Qualité de détermination du stock de carbone

## Schémas de prélèvements

### Matériel :

- Données SOERE acbb Estrées-Mons
- 11 ha
- 257 points de mesure



(INRAe, 2019)



# Qualité de détermination du stock de carbone

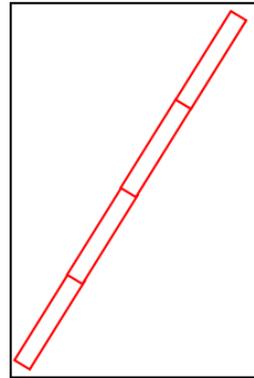
## Schémas de prélèvements

**Nombre de  
prélèvements**

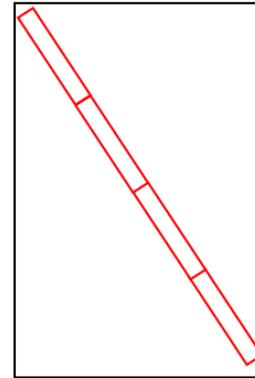
6, 10, 16, 20, 26 et 30



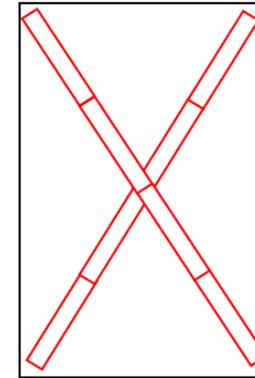
Diagonale  
droite



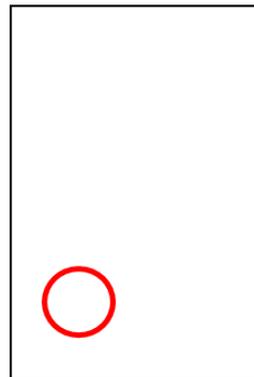
Diagonale  
gauche



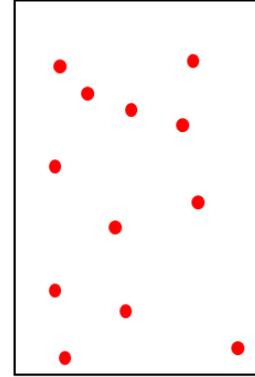
X



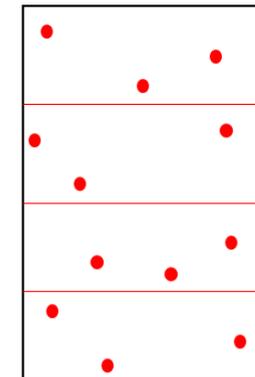
Cluster



Aléatoire



Aléatoire  
stratifié

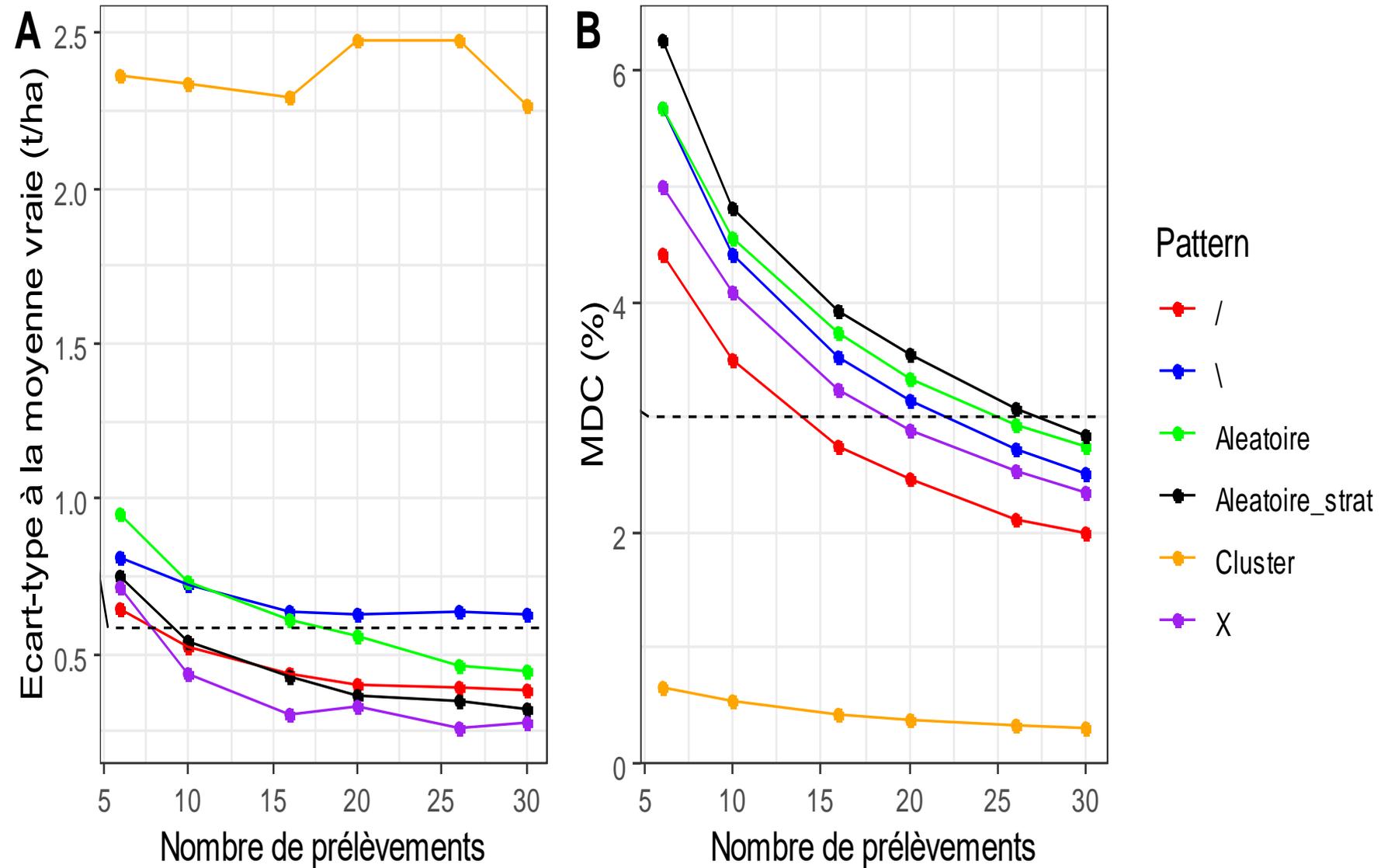


500 tirages  
aléatoires



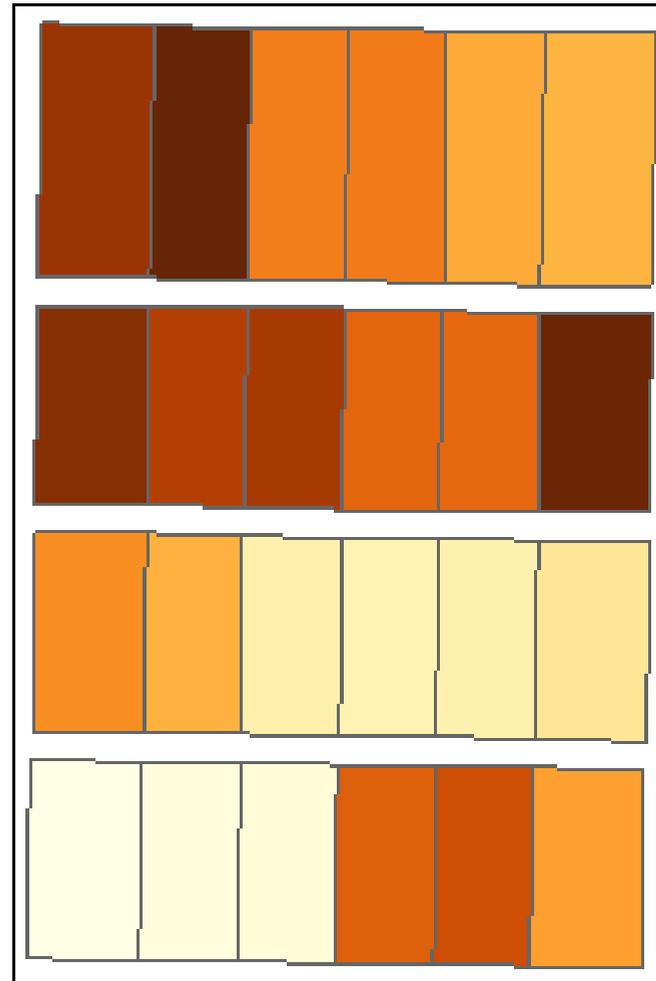
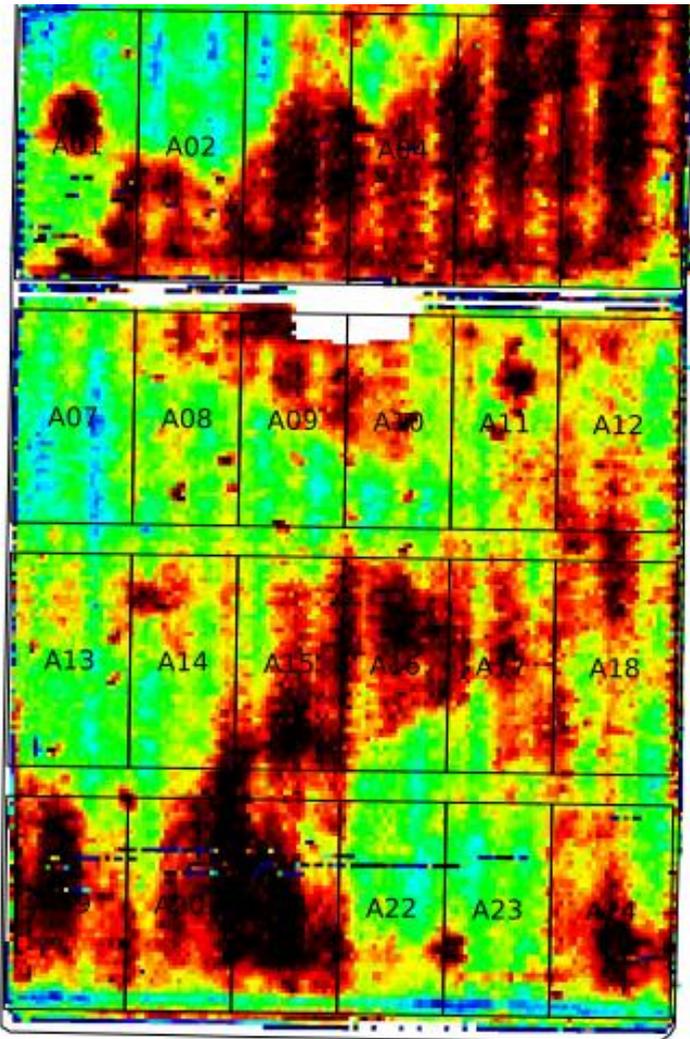
# Qualité de détermination du stock de carbone

## Résultats

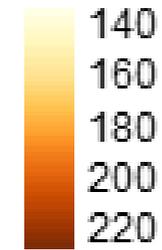




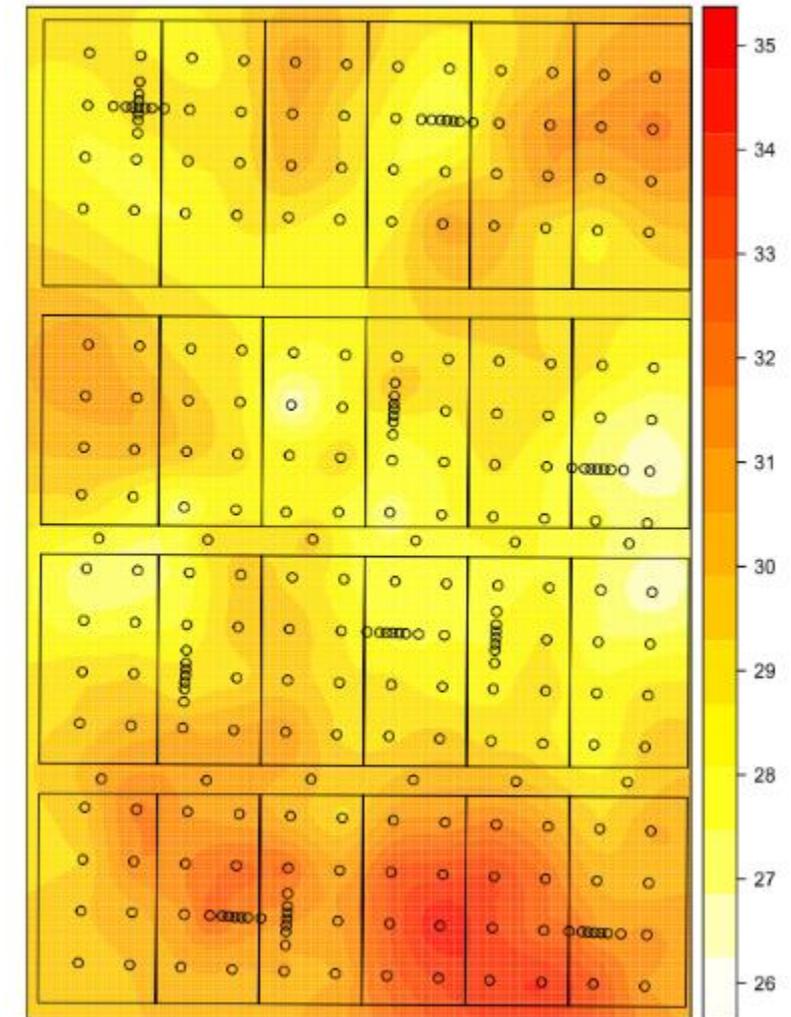
# Représentativité



Teneur en argile (g/kg)

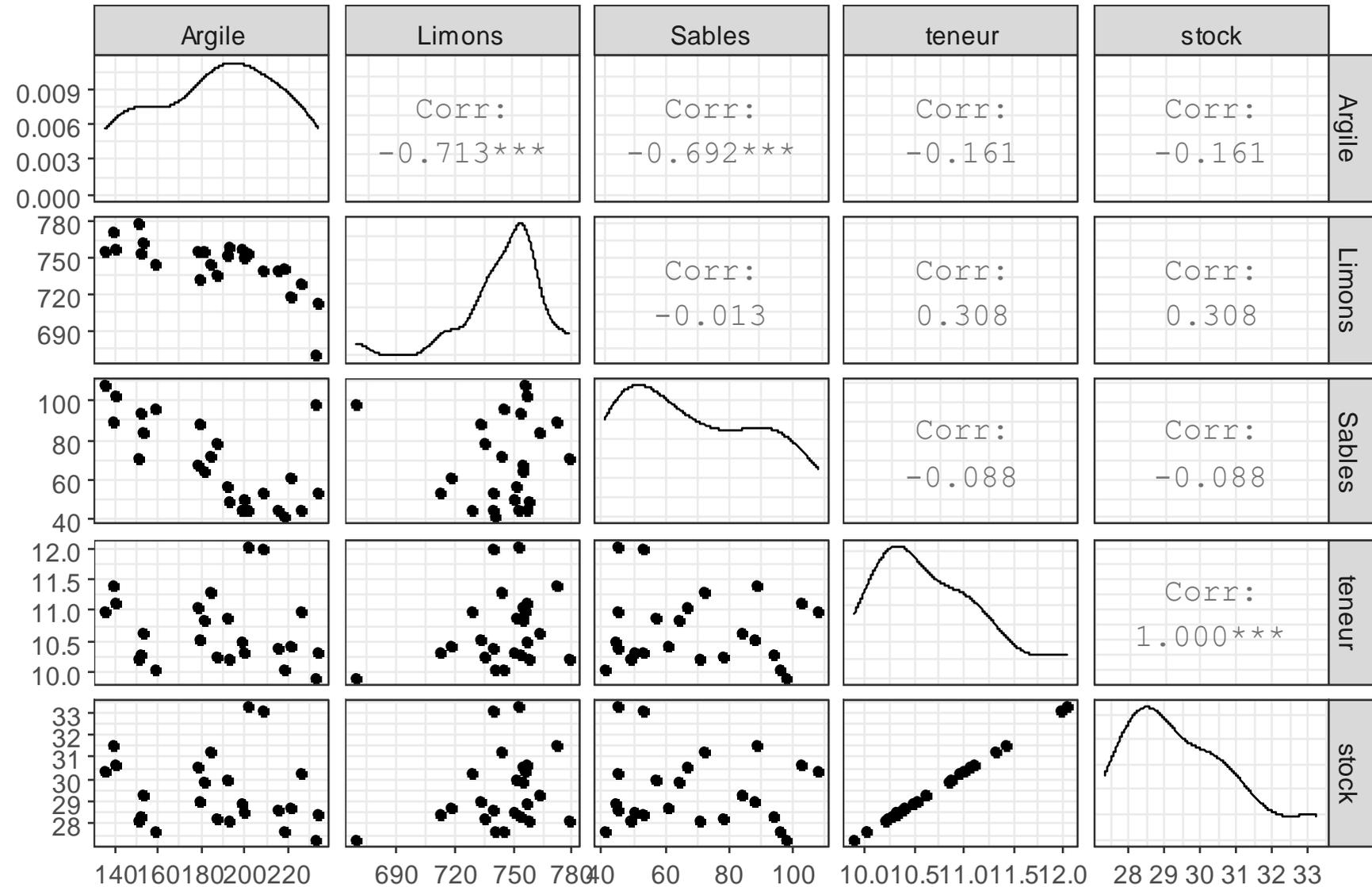


Krigeage : Stock 0-30 cm





# Représentativité



Comment mesurer et suivre l'évolution des stocks de Carbone Organique des Sols cultivés

## Echantillonner à « masse de terre équivalente » !

Antoine BRASSET, Earthworm Foundation  
[a.brasset@earthworm.org](mailto:a.brasset@earthworm.org)

Annie DUPARQUE, Agri-Transfert Ressources et Territoires  
[a.duparque@agro-transfert-rt.org](mailto:a.duparque@agro-transfert-rt.org)



**Groupe FORBS COMIFER**  
**13 octobre 2021**



# Détermination du stock initial

## Calcul du stock à masse équivalente

**Stock (t/ha)**

**=**

**Masse tf (t/ha) x Teneur (g/kg) x  
(1/1000)**

**Masse tf (t/ha)**

**=**

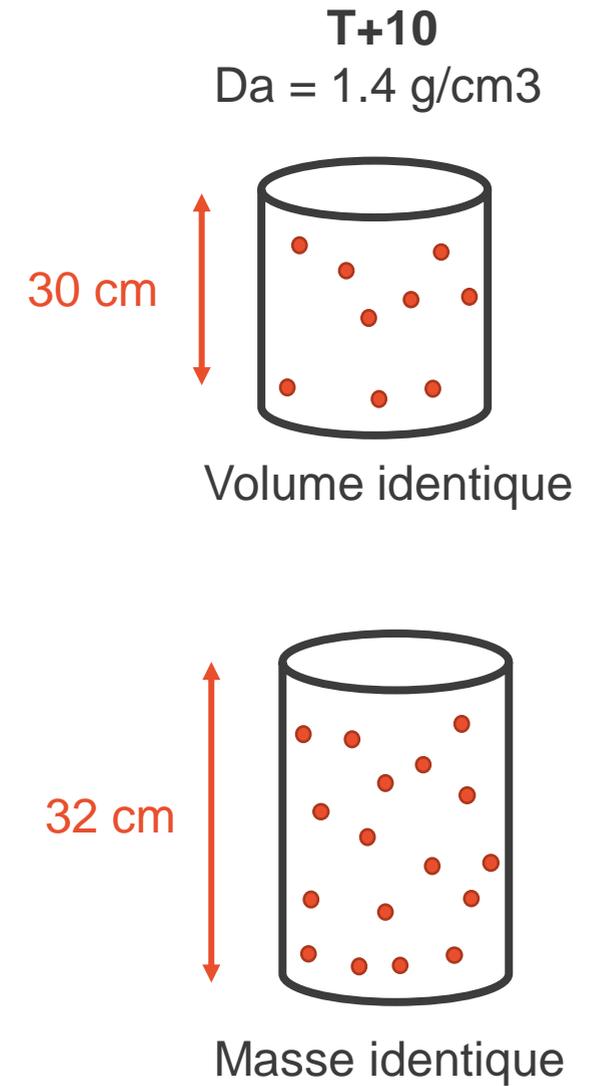
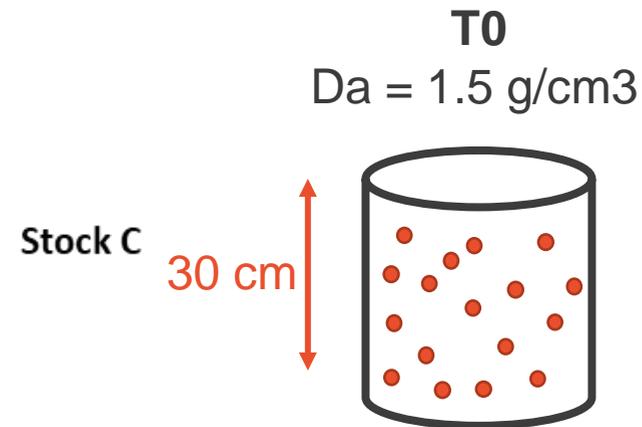
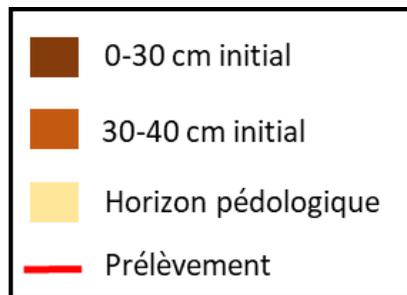
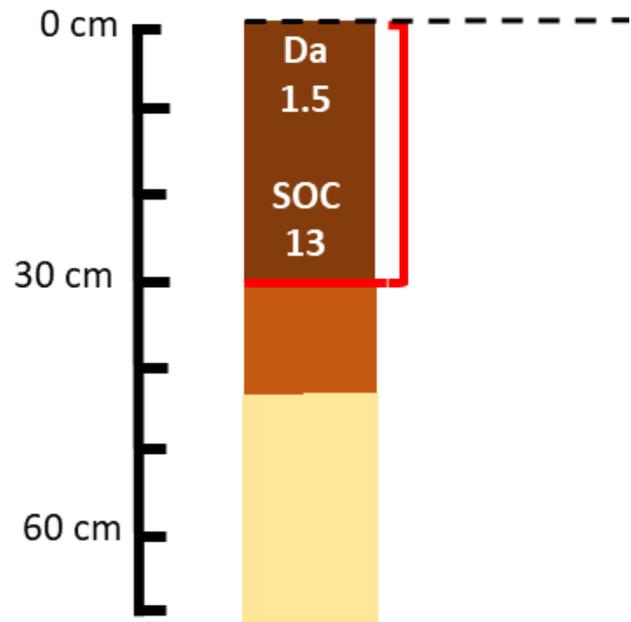
**Da (g/cm<sup>3</sup>) x Prof (mm) x 10**





# Détermination du stock initial

## Calcul du stock à masse équivalente





# Détermination du stock initial

## Calcul du stock à masse équivalente

**Comparaison de stocks pertinentes = stock à masses équivalentes**

**Définir une  
masse de  
référence**



**Une méthode pour recalculer les  
stock à la masse de référence**



# Détermination du stock initial

## Calcul du stock à masse équivalente

### Méthode de la littérature

- Ellert et Bettany, 1995
- Gifford et Roderick, 2003
- Wendt et Hauser, 2013
- Ferchaud, Vitte, et Mary, 2016

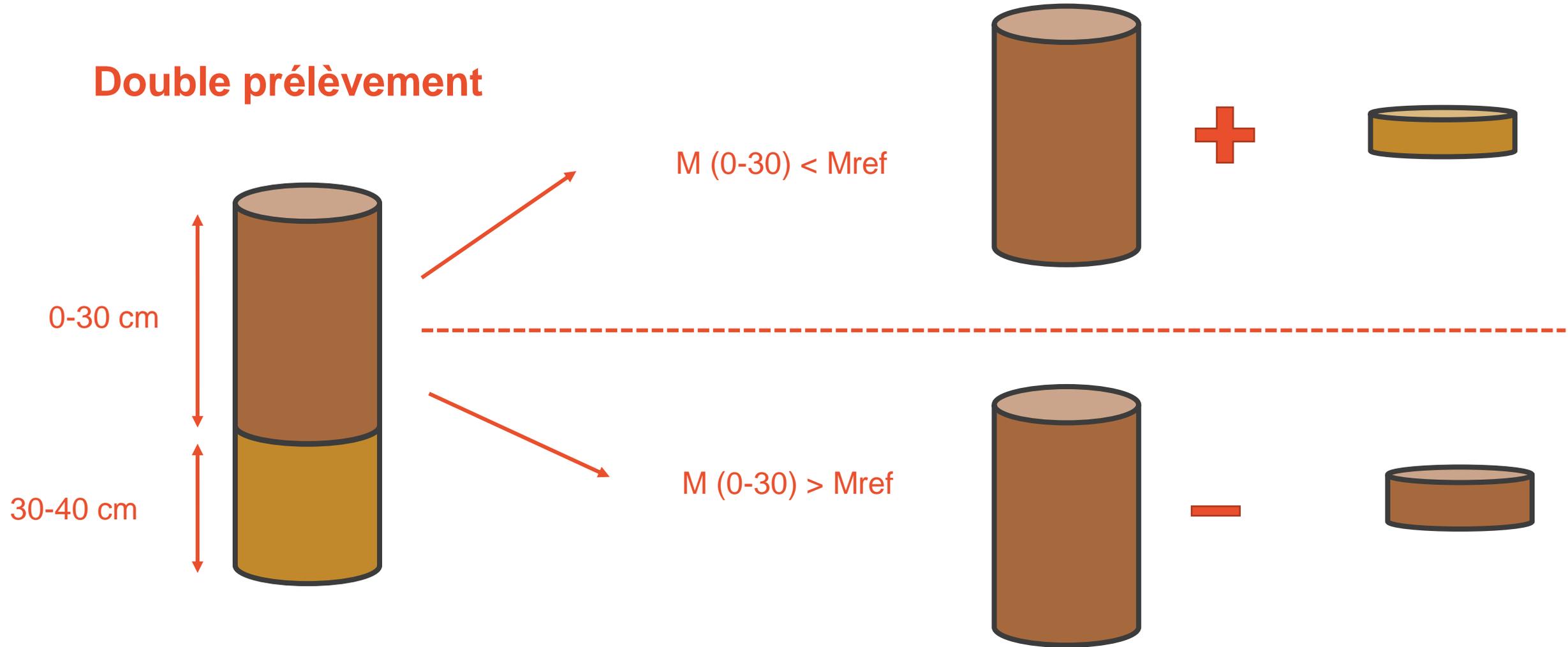
Coûteux en temps et en analyses  
Méthode adaptée à la recherche



# Qualité de détermination du stock de carbone

## Concept du calcul à masse équivalente

### Double prélèvement





# Qualité de détermination du stock de carbone

## Méthode de calcul de stock à masse équivalente

### Matériel :

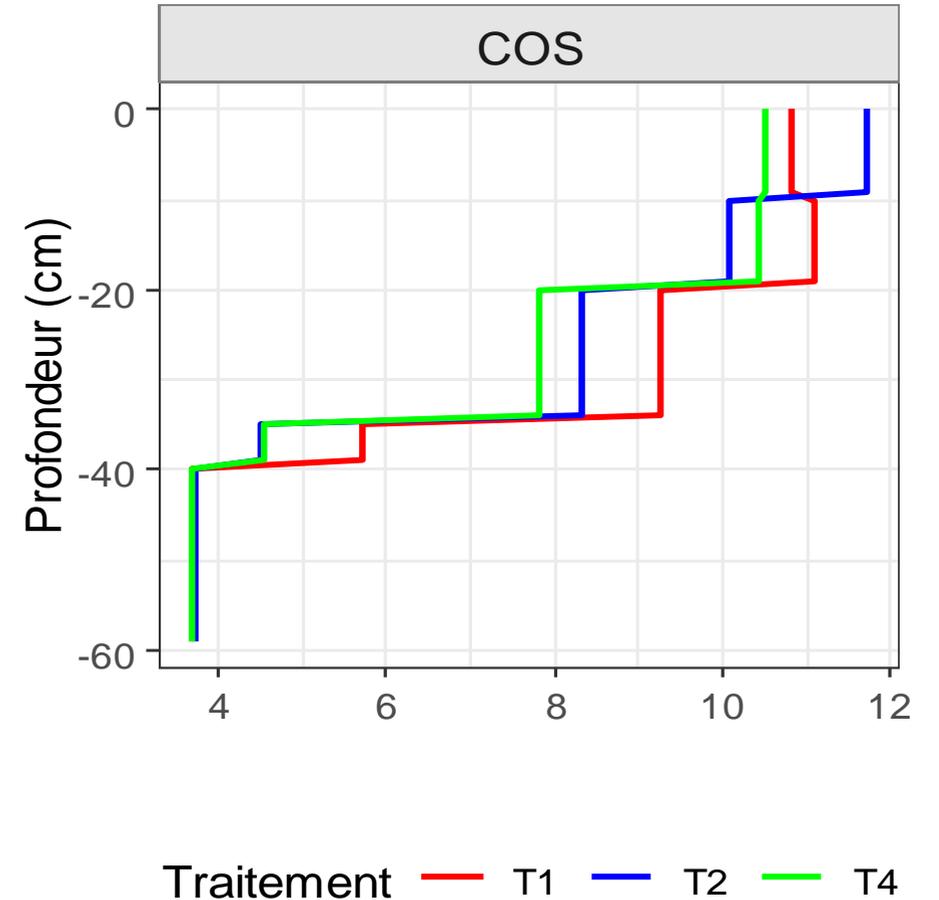
Données SOERE acbb Estrées-Mons (2015) :

- Traitement Labouré (T1, T4)
- Traitement TCS (T2)

Calcul des stocks 0-30 cm et 0-35 cm

Stock de référence → Méthode INRAE (SEME)

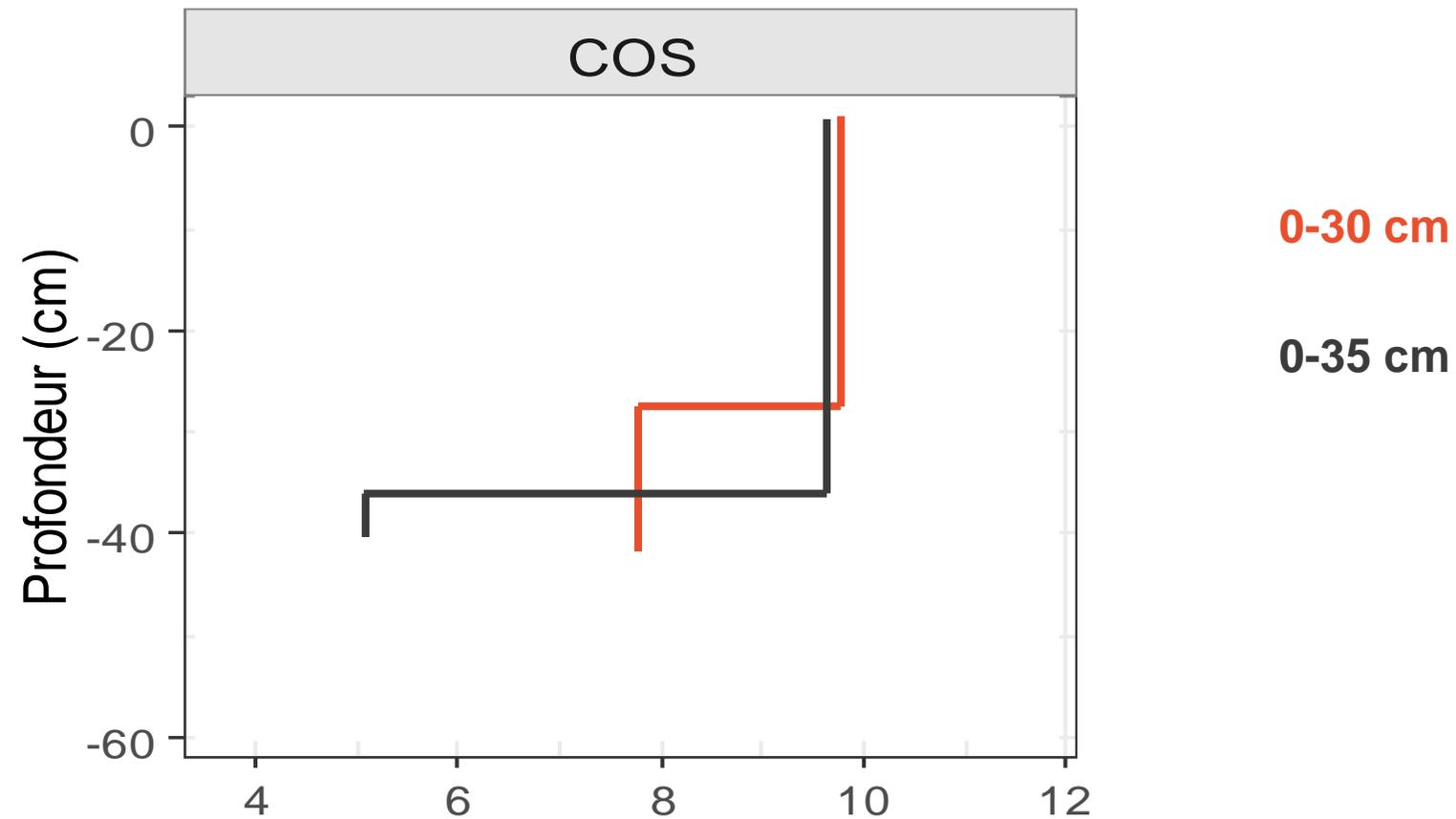
Comparaison de 3 méthodes à la ref





# Qualité de détermination du stock de carbone

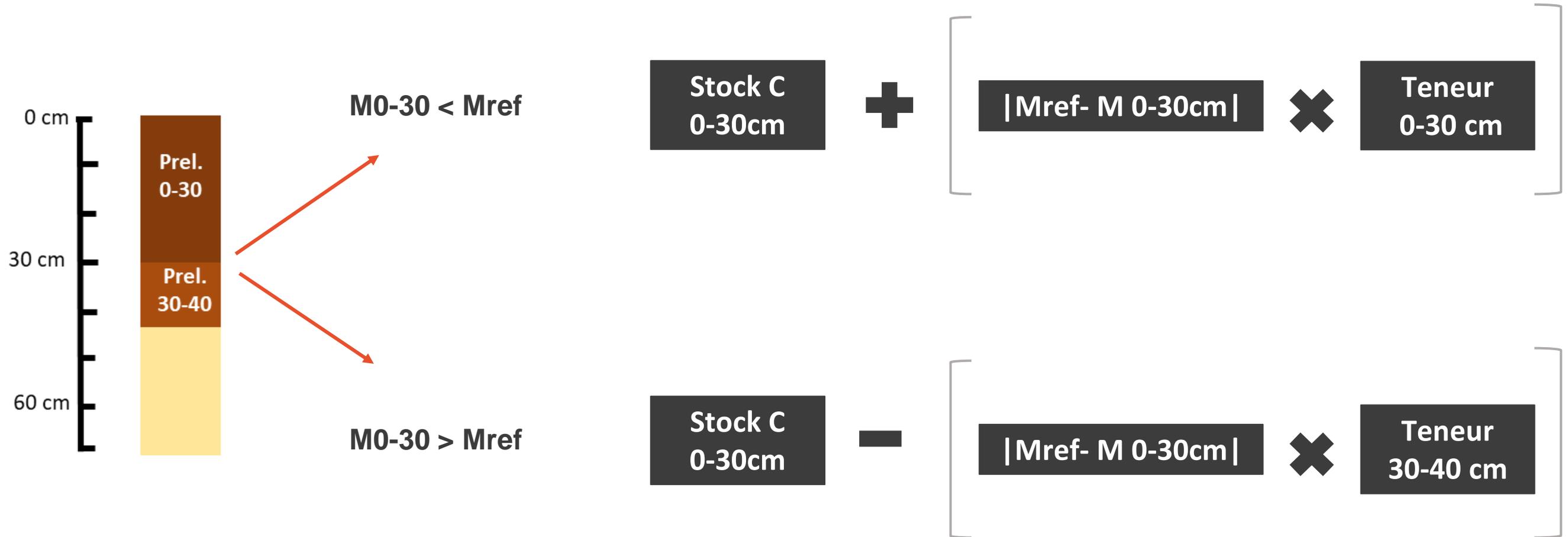
## Méthode de calcul de stock à masse équivalente





# Qualité de détermination du stock de carbone

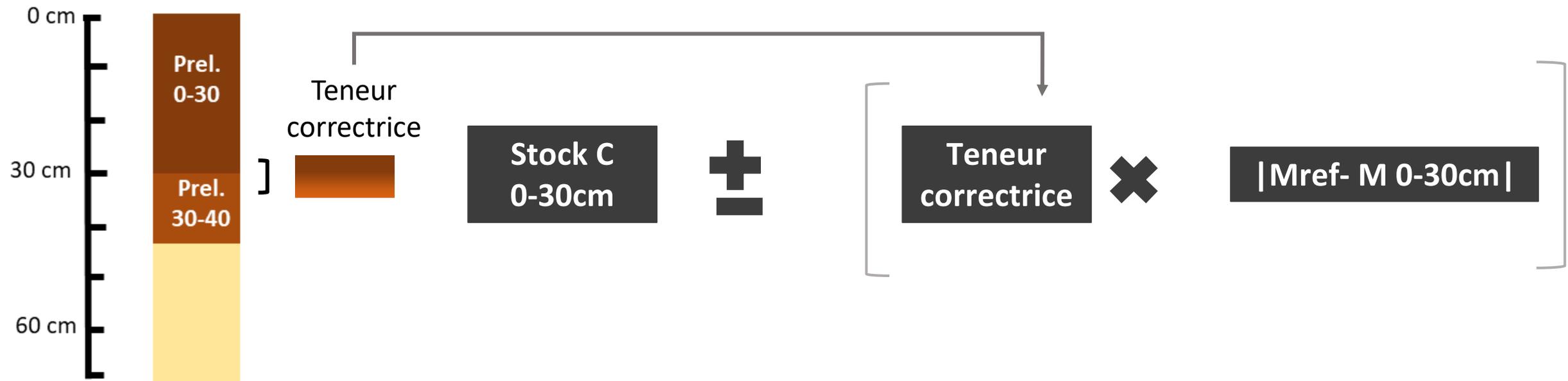
## Méthode ESM





# Qualité de détermination du stock de carbone

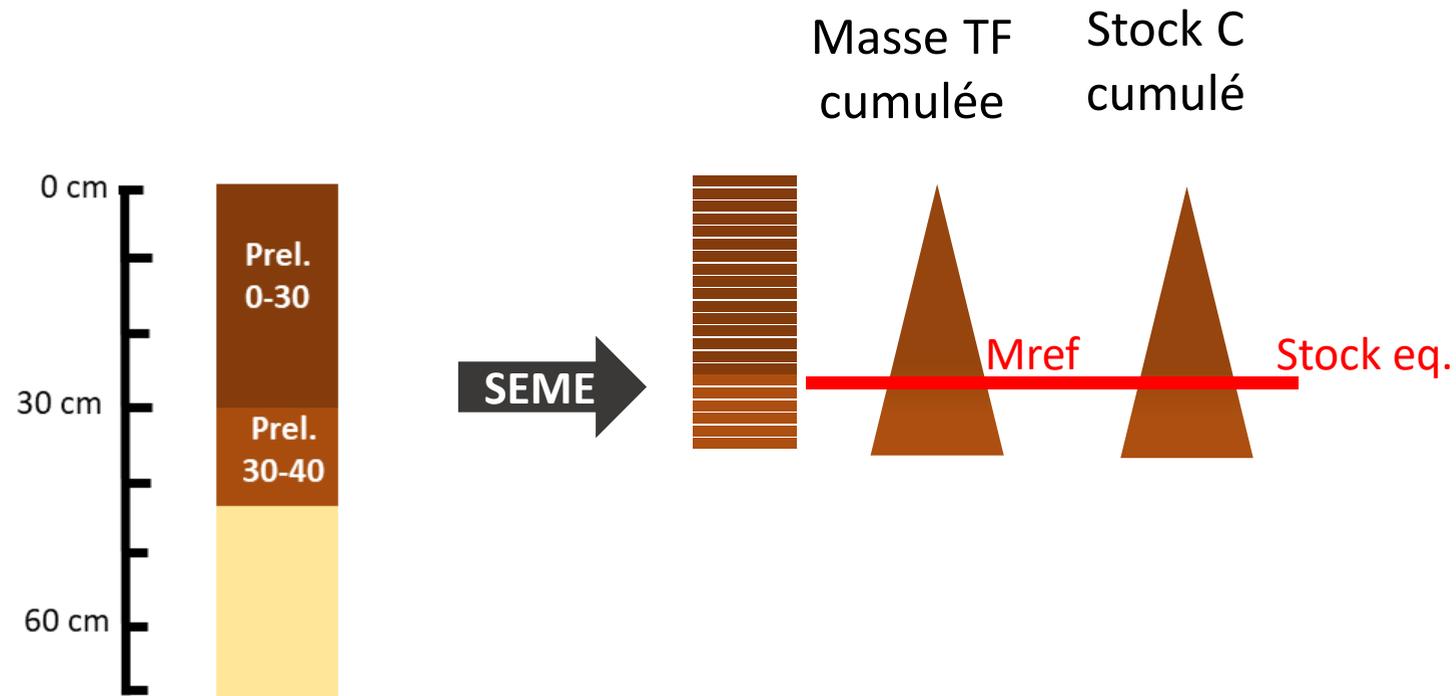
## Méthode MEPA





# Qualité de détermination du stock de carbone

## Méthode SEME



(Chlebowski et al., 2019)



# Qualité de détermination du stock de carbone

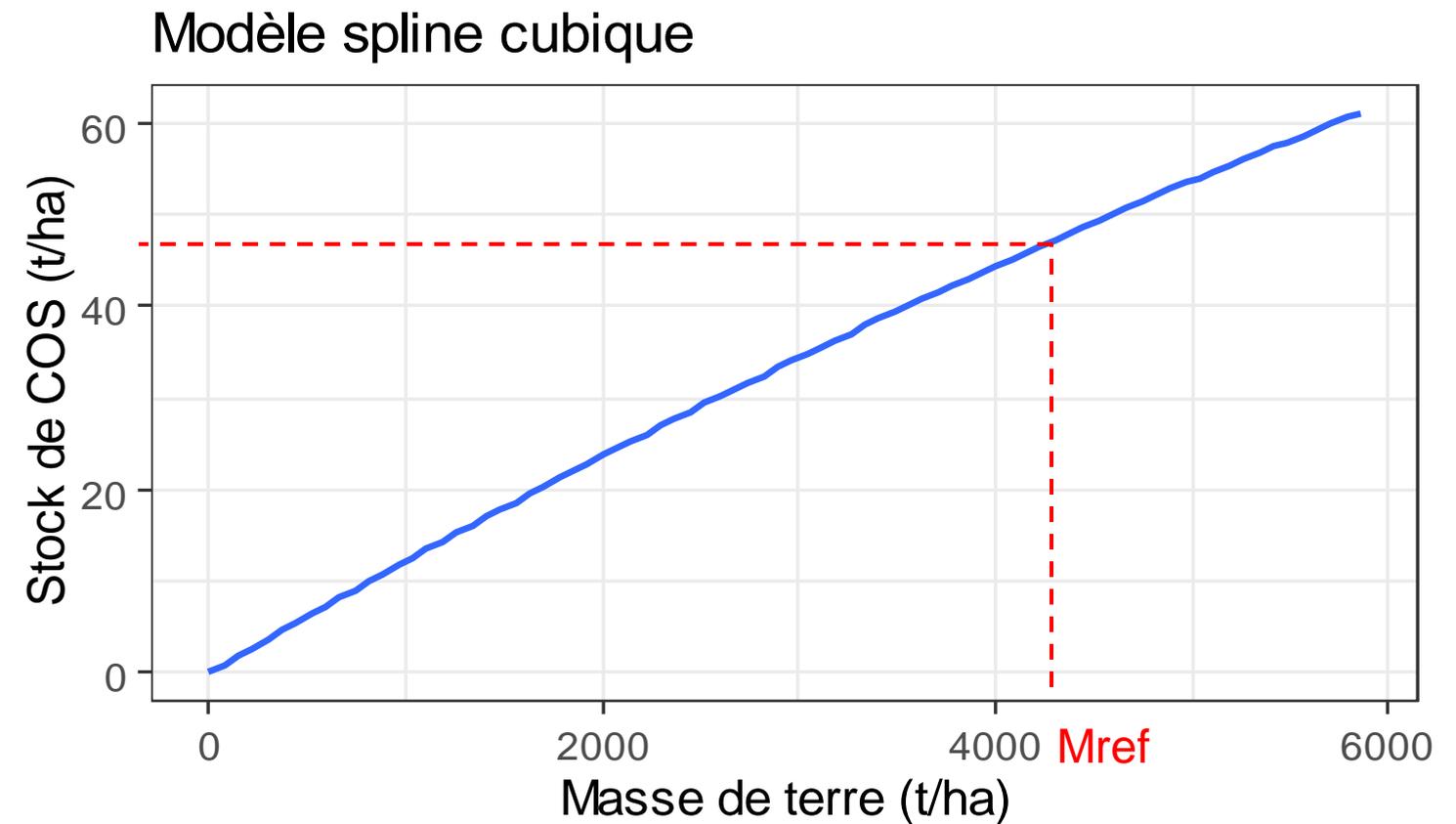
## Méthode Spline cubique

### Pour chaque parcelle :

Calcul de 3 stocks :

- Stock à 0 cm
- Stock à 30 cm
- Stock à 40 cm

Stock eq





# Qualité de détermination du stock de carbone

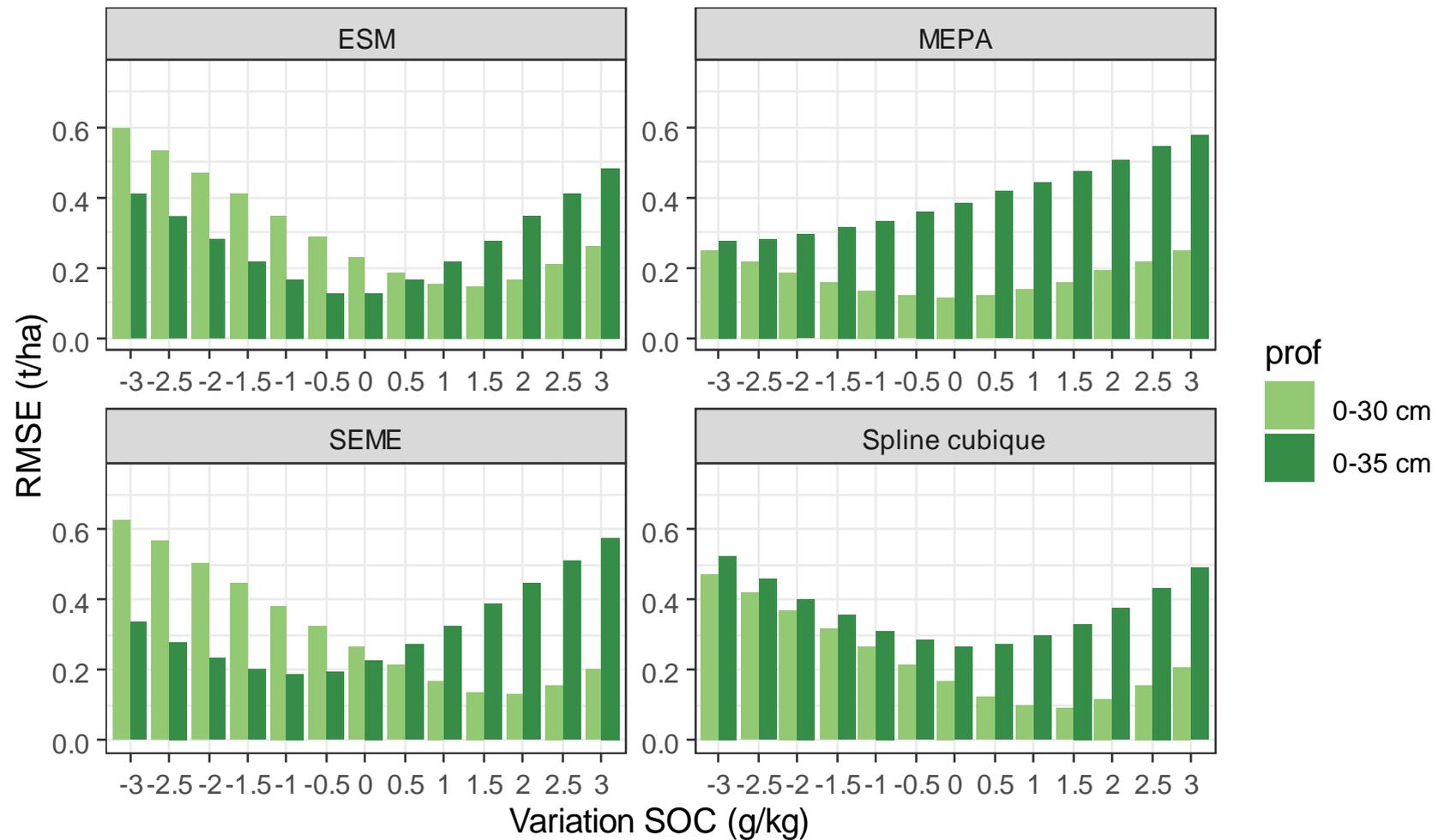
Performance des méthodes de calculs de stock à masse équivalente

Méthode	Biais		R2		RMSE		RRMSE		MAE		RMAE	
	(t COS/ha)		(%)		(t COS/ha)		(%)		(t COS/ha)		(%)	
	0-30	0-35	0-30	0-35	0-30	0-35	0-30	0-35	0-30	0-35	0-30	0-35
<b>Prof. cst.</b>	0.56	0.25	90.3	95.5	1.24	0.96	2.9	1.9	0.96	0.76	2.2	1.5
<b>ESM</b>	0.13	-0.01	99.7	99.9	0.23	0.13	0.5	0.3	0.18	0.09	0.4	0.2
<b>MEPA</b>	-0.05	-0.32	99.9	99.8	0.11	0.39	0.3	0.8	0.09	0.32	0.2	0.7
<b>SEME-Simpl.</b>	0.21	-0.16	99.8	99.9	0.27	0.23	0.6	0.5	0.21	0.17	0.5	0.3
<b>Spline cubique</b>	0.01	-0.19	99.8	99.8	0.15	0.27	0.3	0.5	0.12	0.19	0.3	0.4



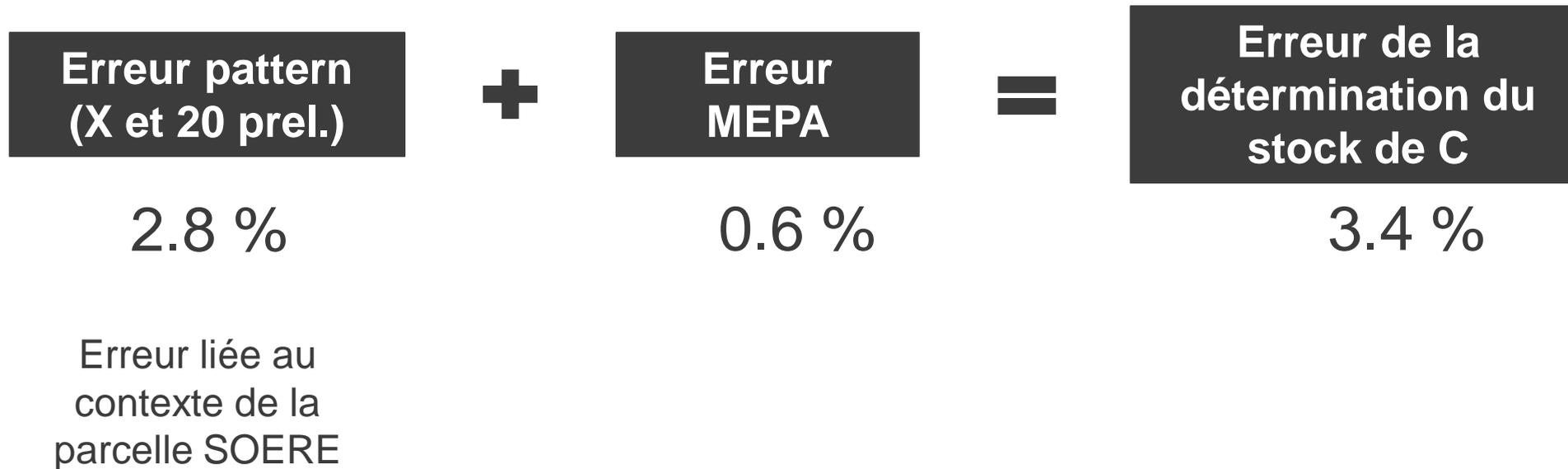
# Qualité de détermination du stock de carbone

## Sensibilité à la variation de la teneur correctrice





# Qualité de détermination du stock de carbone



Comment mesurer et suivre l'évolution des stocks de Carbone Organique des Sols cultivés

# Mettre en évidence l'effet des pratiques à moyen terme sur le Stock de COS

Antoine BRASSET, Earthworm Foundation  
[a.brasset@earthworm.org](mailto:a.brasset@earthworm.org)

Annie DUPARQUE, Agri-Transfert Ressources et Territoires  
[a.duparque@agro-transfert-rt.org](mailto:a.duparque@agro-transfert-rt.org)



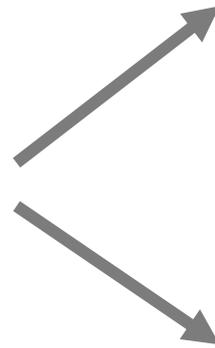
**Groupe FORBS COMIFER**  
**13 octobre 2021**



# Besoins de précisions de la détermination du stock

## SdC type de Picardie

SdC
Céréaliier
Betteravier
Plantes sarclées
Pdt conso et légumes



### Version Initiale

- Biomasse 1 à 2 t MS/ha
- Exportation des pailles 1 an / 3 ans

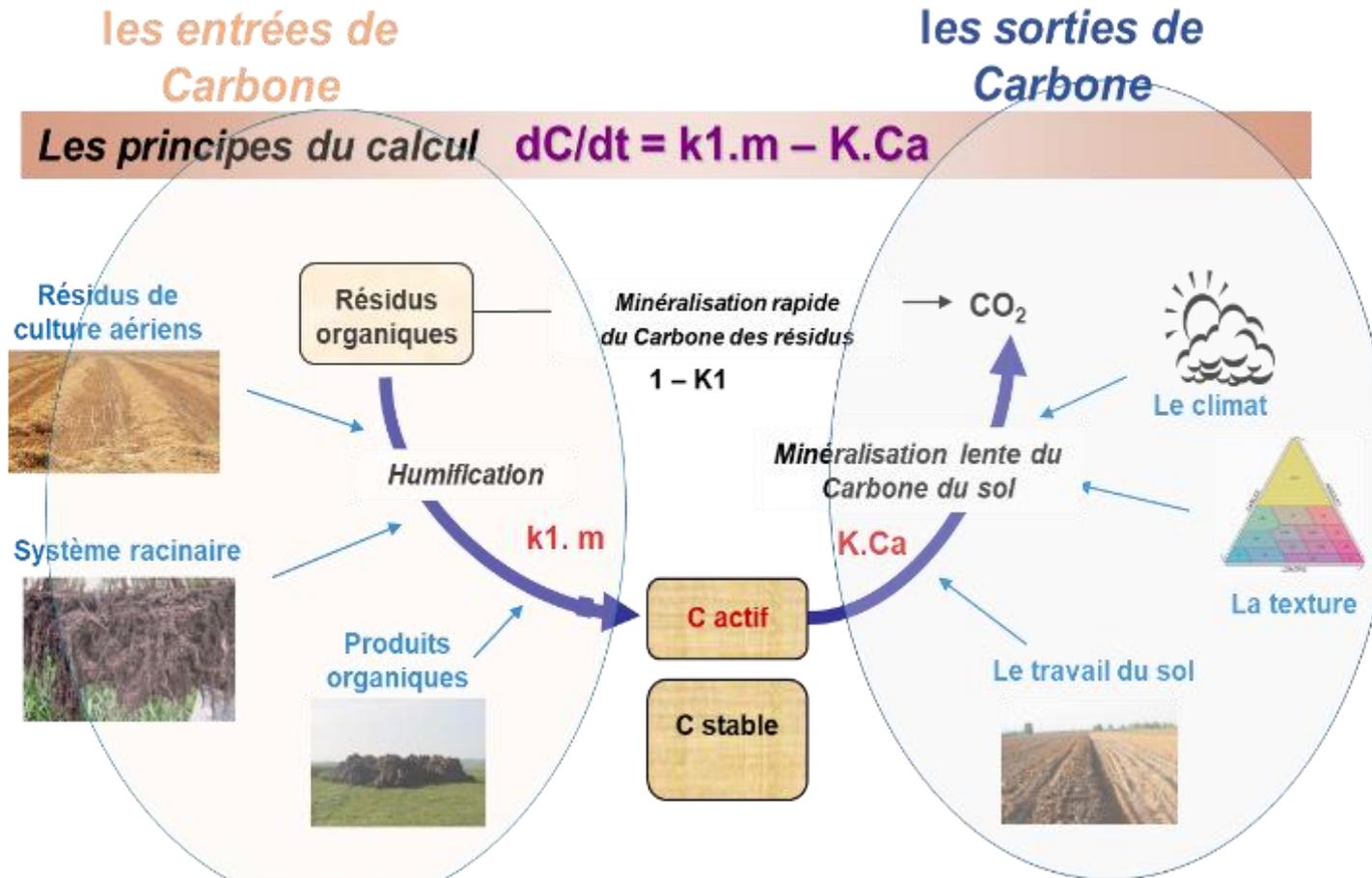
### Version Alternative

- Biomasse 2 à 3 t MS/ha
- Restitution de toutes les pailles



# Modélisation de l'évolution du stock de COS

## Le modèle AMG\*



\*AMG, du nom de ses auteurs: Andriulo, Mary, Guérif - INRA de LAON

L'outil **SIMEOS**  
AMG

[www.simeos-amg.org](http://www.simeos-amg.org)

Outil réalisé par :

En partenariat avec :

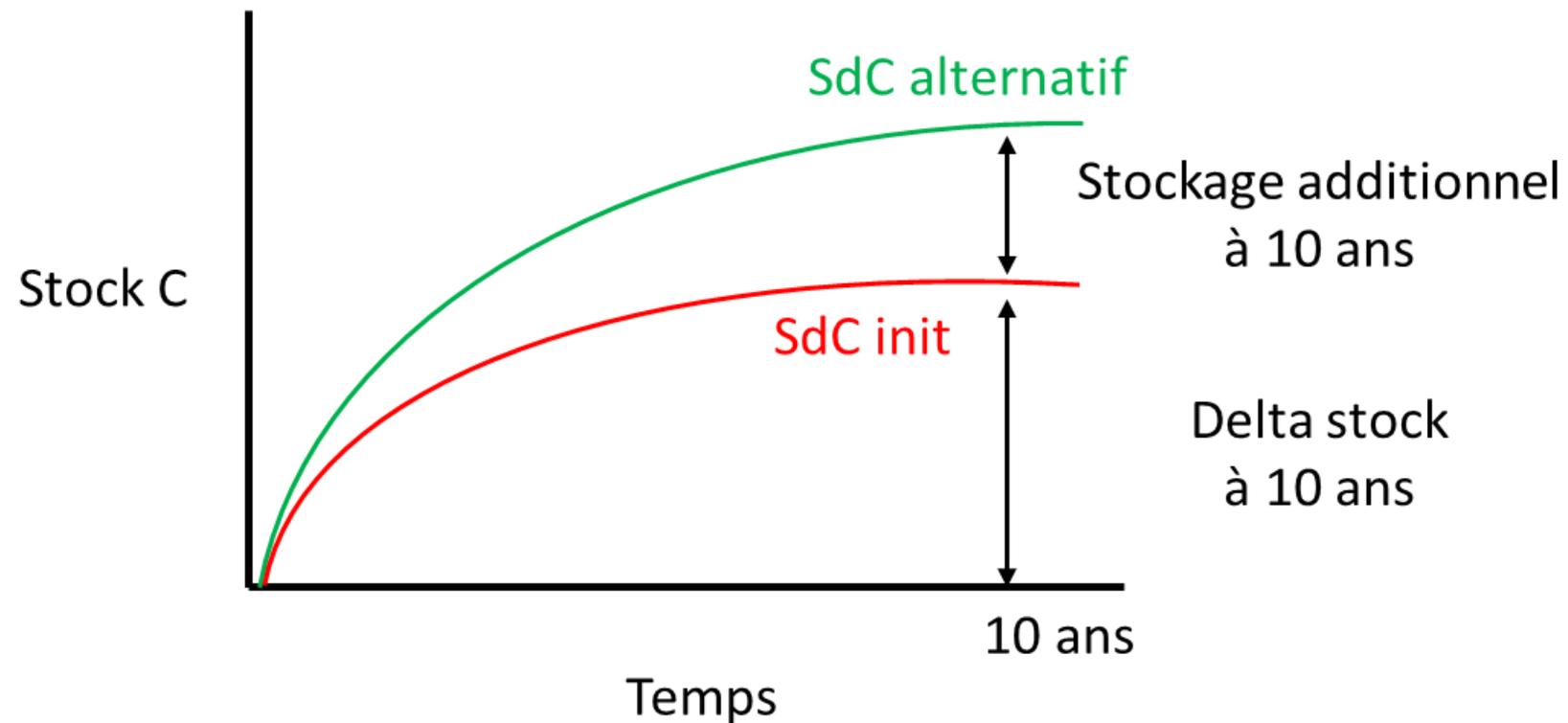
Avec le concours financier de :



# Besoins de précisions de la détermination du stock

## Métriques d'évaluation

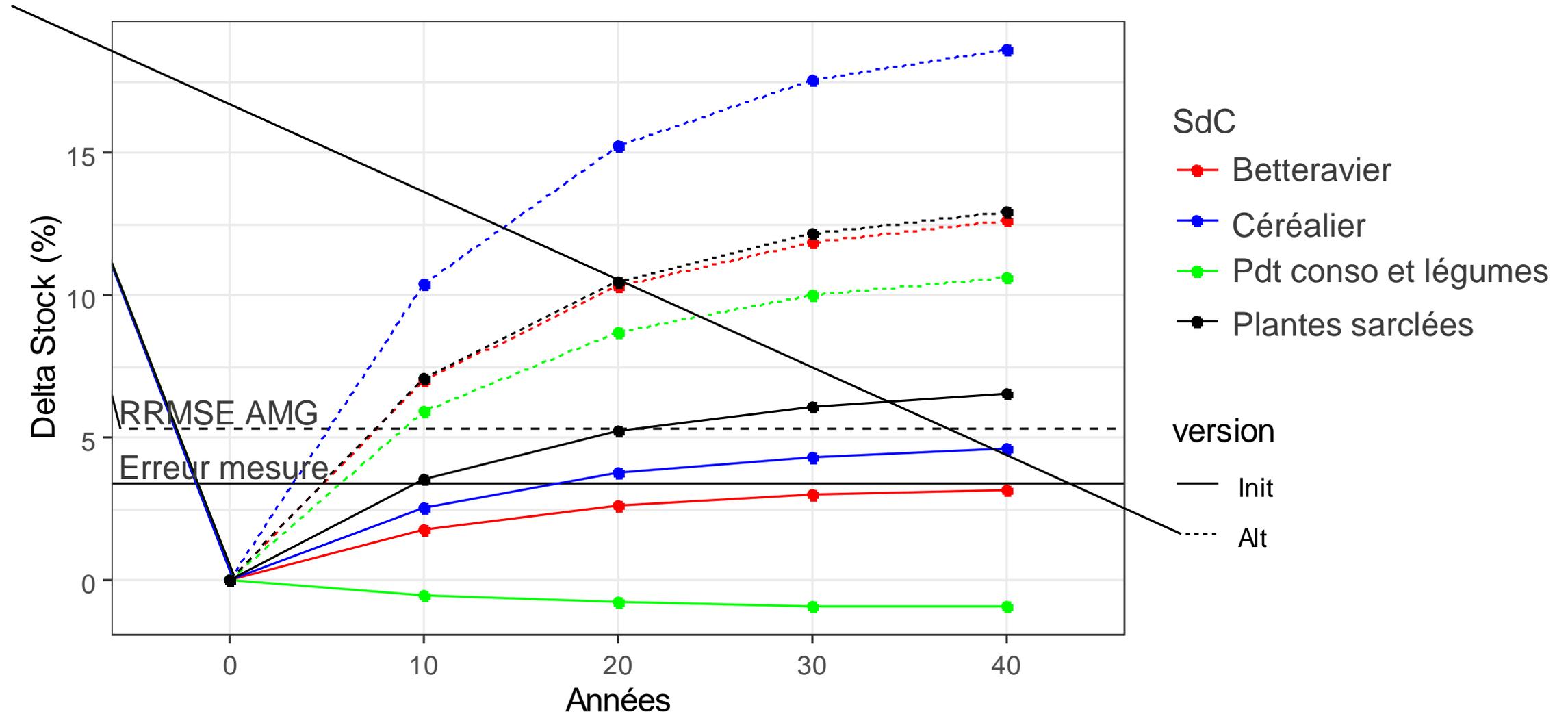
$$\Delta_{stock} = Stock_n - Stock_0$$





# Besoins de précisions de la détermination du stock

## Métriques d'évaluation





# Conclusions

Stock de 40  
t C/ha

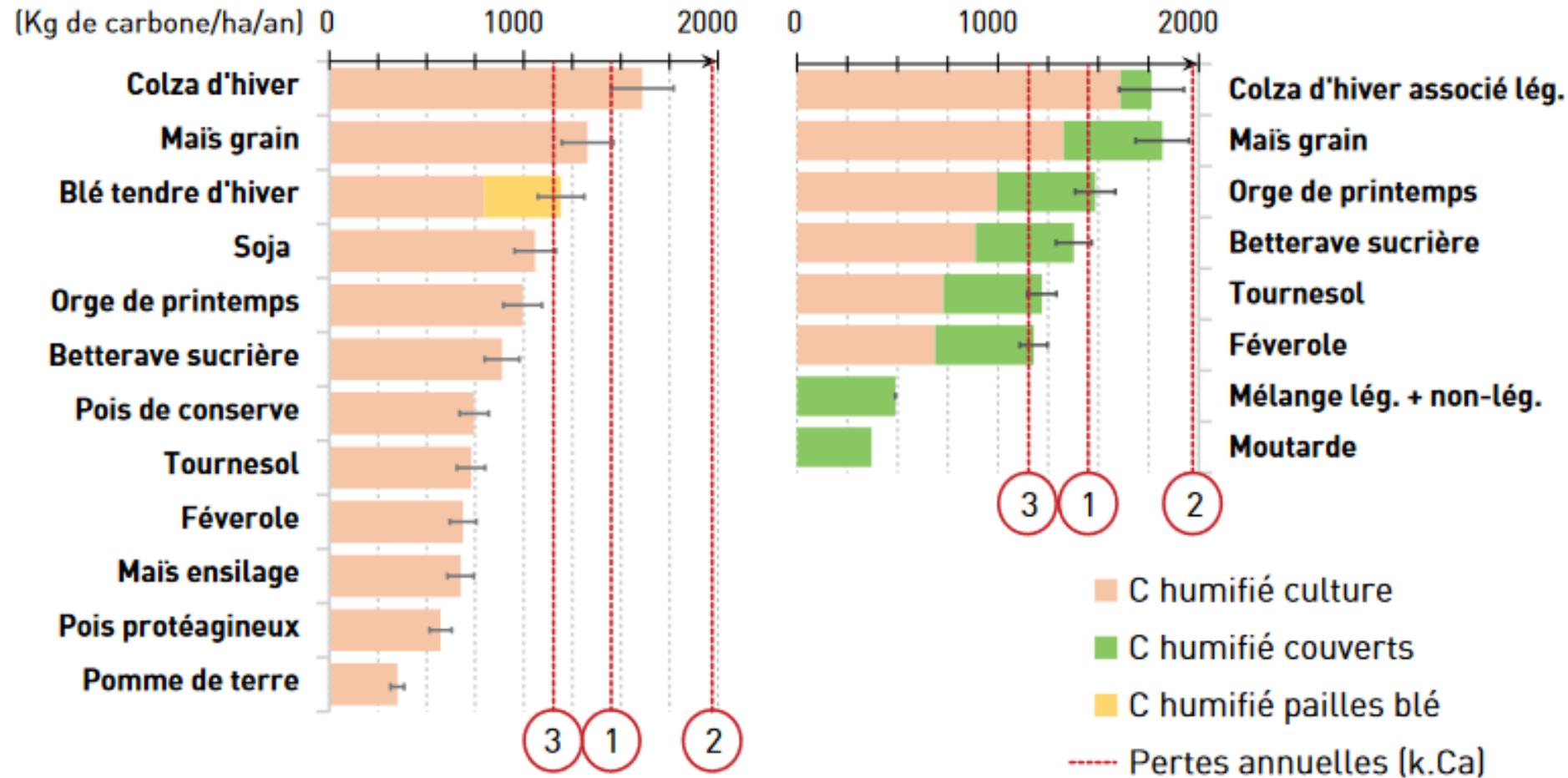
Variation de  
3.4%

+ 1.36  
t C/ha

Soit 136  
kg C/ha/an

**Stockage de C additionnel lié à  
l'insertion et à l'allongement des  
couverts (Pellerin et al., 2019)**

# ENTRÉES DE CARBONE HUMIFIÉ : certains résidus de culture et couverts se distinguent

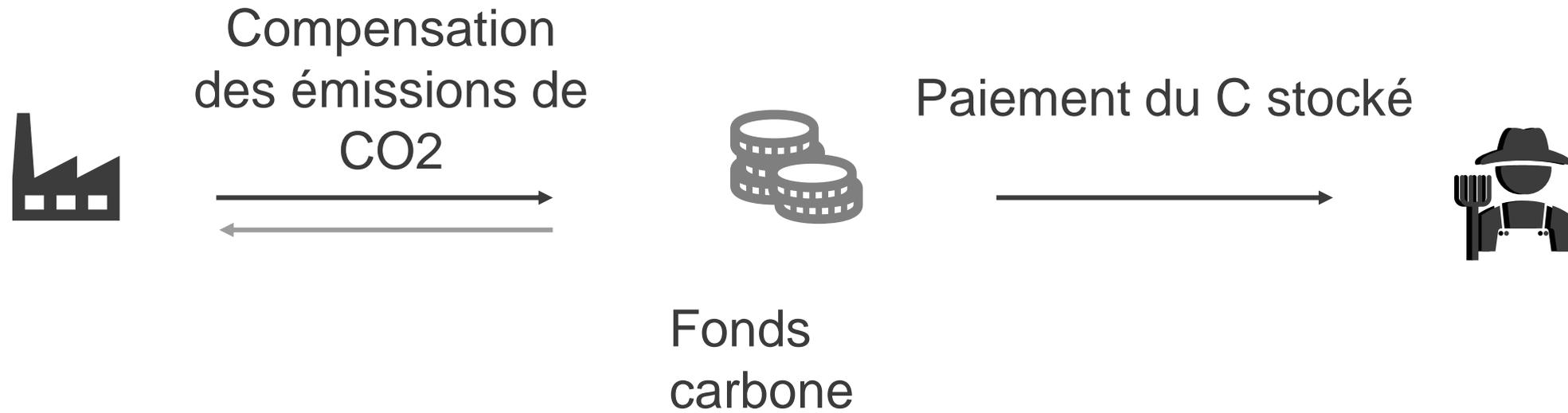


**Figure 3 : Entrées de carbone humifié et pertes moyennes de carbone minéralisé simulées avec Simeos-AMG pour quelques cultures principales (à gauche) et couverts (à droite), seuls ou associés, en interculture ou avec à une culture de rente.** Pertes annuelles par minéralisation pour ① un sol de limon moyen-profond à 1,6 % de matière organique (cas courant) ou ② à 2,0 % (Syppre), ③ un sol argilo-calcaire à 3 % de matière organique. Les rendements utilisés dans la simulation correspondent à des valeurs fréquemment rencontrées en Picardie (ex. : 90 q/ha pour le blé). Incertitude de 10 % sur les résultats.

(Perrin et al., 2019)



# Stock de COS et stockage de Carbone...





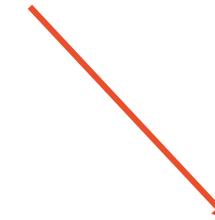
# Mécanisme de la rémunération



Rémunération *a priori* du **stockage de C** par les pratiques



Modélisation



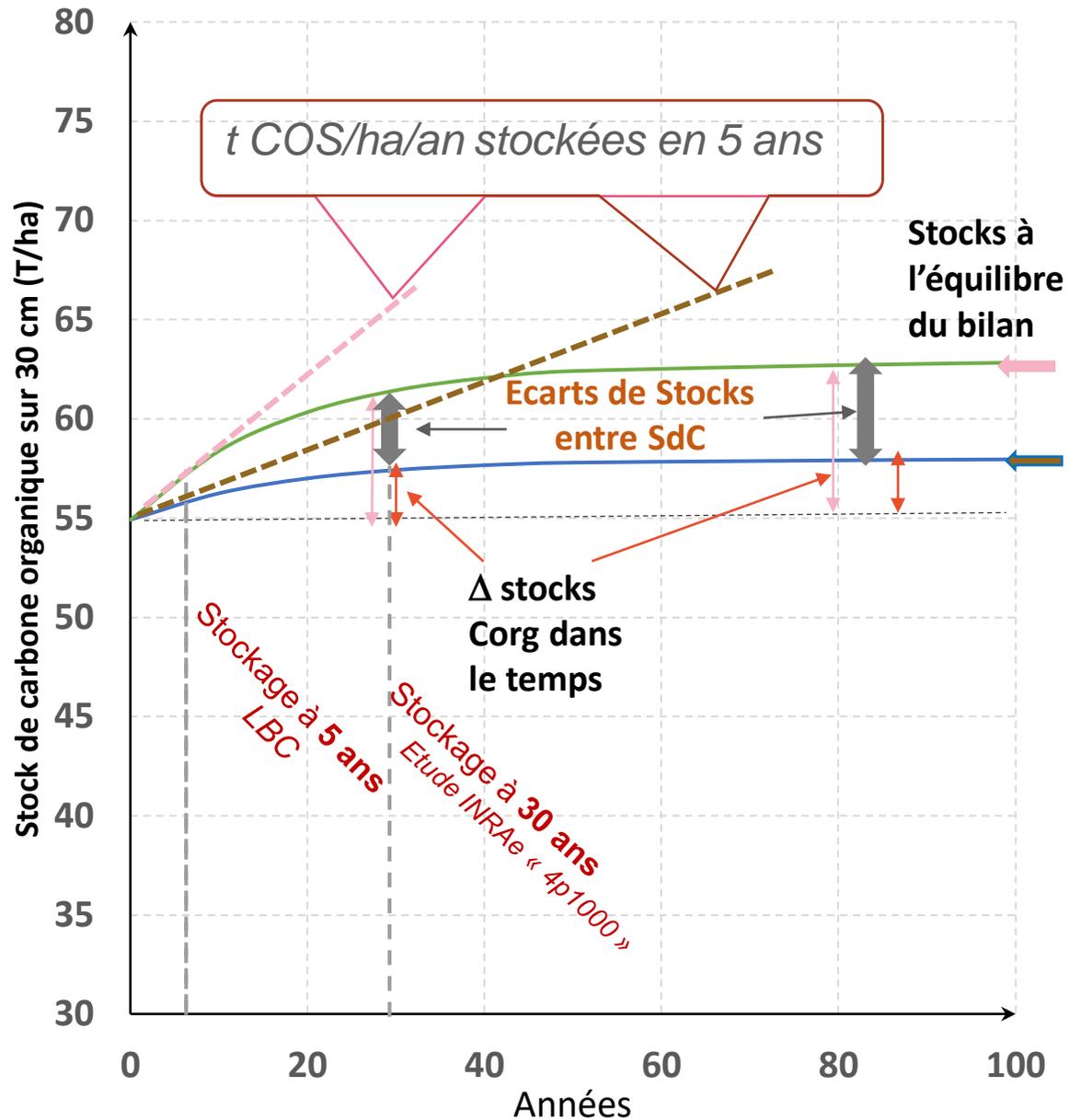
Évolution entre t0 et t+5



Évolution par rapport à  
une référence



# A quels paramètres s'intéresser ?



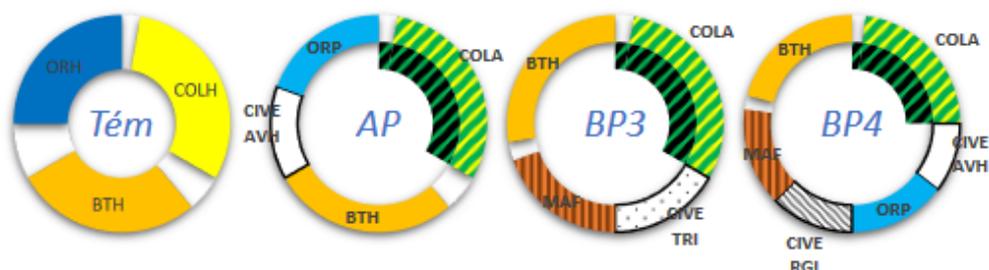
Etude « 4pour1000 » INRAe 2019 :  
Estimation du stockage différentiel à 30 ans

Dans le cadre du LBC :  
Intégration du stockage  
différentiel de COS au bilan GES :

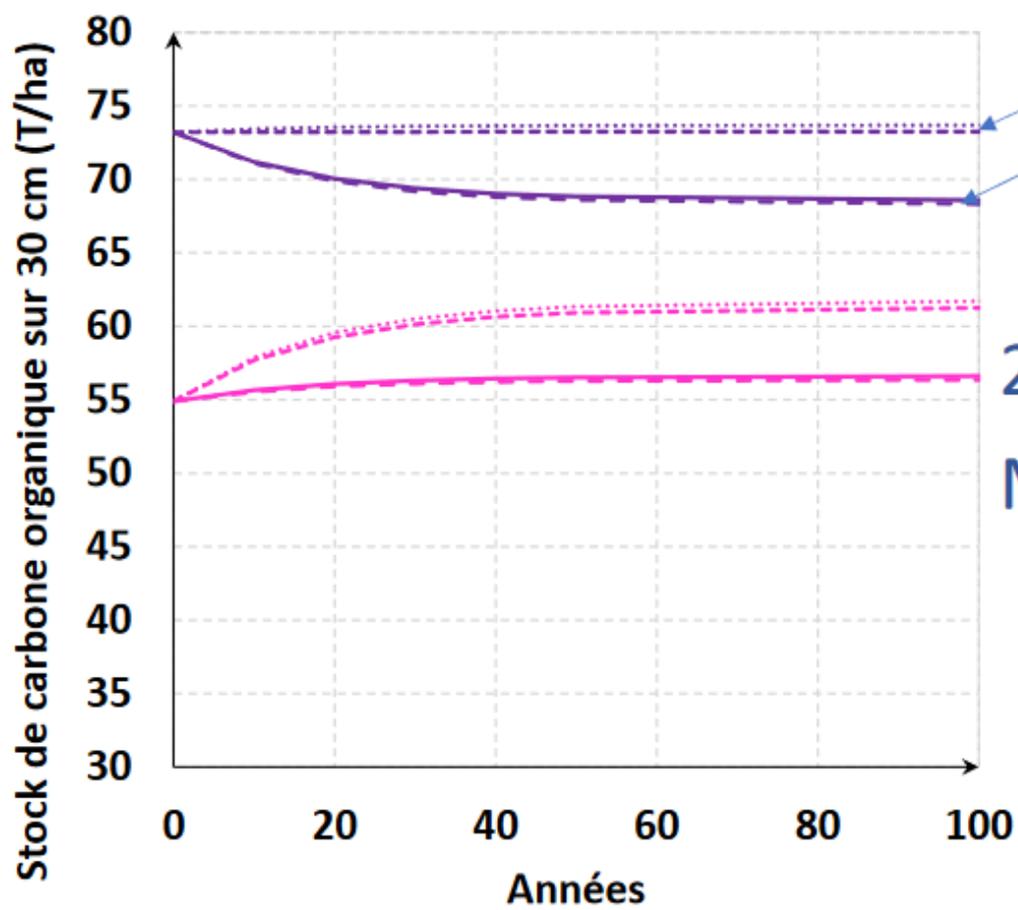
**Différences de tonnes de COS  
stockées/ha/an entre SdC  
« référence » et « projet »**

**X 3,67  $\Rightarrow$  t eq CO<sub>2</sub>/ha/an**

# SAS PIVERT Et si on change de parcelle ?



	Argile (g/kg)	Calcaire (g/kg)	Da	Teneur Corg (g/kg)	C/N
Teneur plus forte	241	309	1,54	16	9,6
Sol initial	241	309	1,54	12	9,6



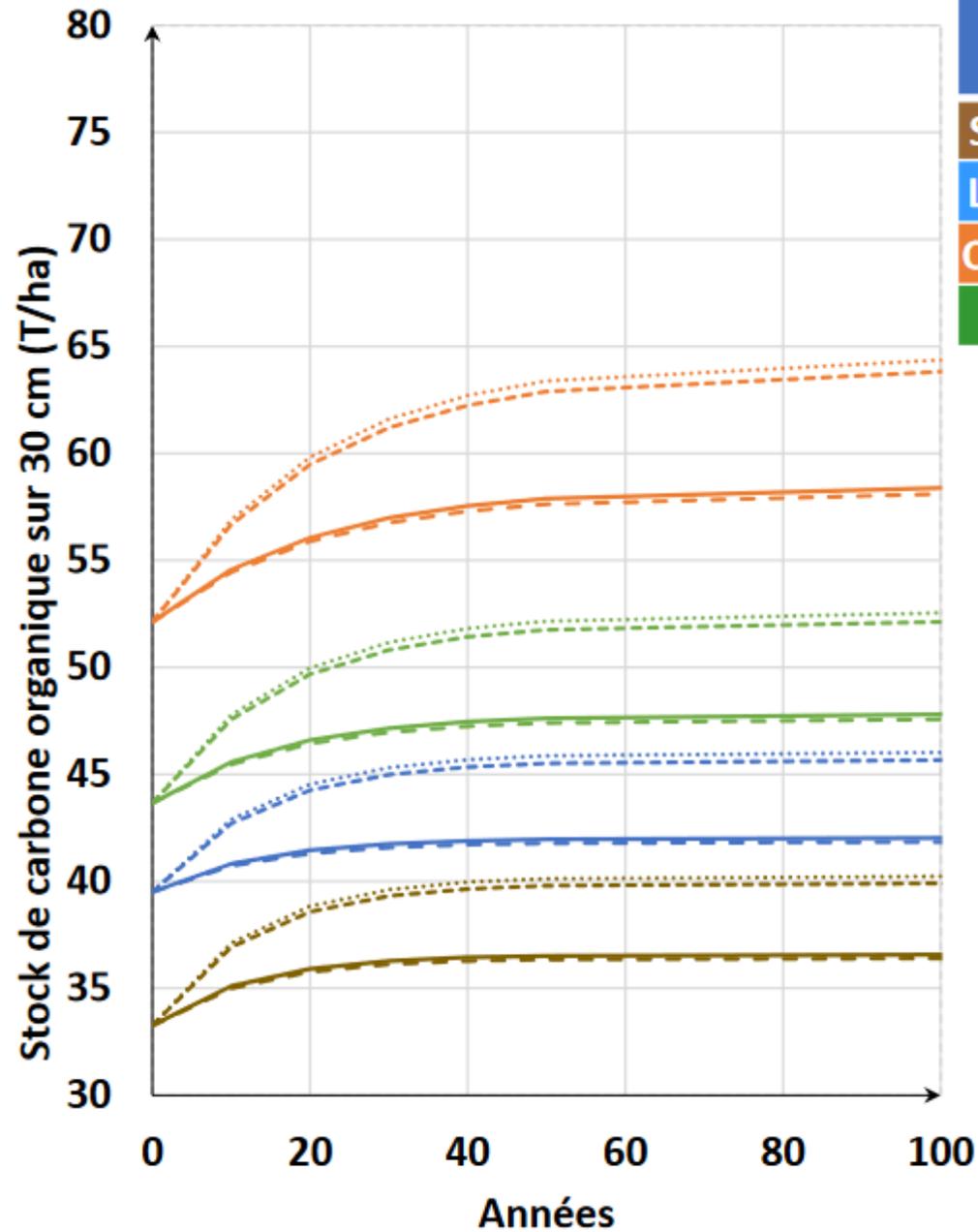
BP3 & BP4  
TEM & AP

2,06 %MO → 2,75 %MO

Mêmes hypothèses rdt

- ➔ Inversions de tendances
- ➔ Même classement des SdC
- ➔ Mêmes écarts





	Argile (g/kg)	Calcaire (g/kg)	Da	Corg (g/kg)	C/N
Sabl. Lim. Pfd	90	80	1,4	8	8,4
Lim. Moy. Pfd	165	10	1,4	9,5	8,4
Cran. sur craie	110	600	1,35	13	8,4
Lim. Arg.	225	30	1,4	10,5	8,1

- Stockage partout

- Fortes entrées C humifié

- Résidus du colza
    - Résidus de CI et CIVE (3 cultures en 2 ans)

➤ **Mêmes classements des différences d'ordres de grandeur des écarts**





# Perspectives

- 1 analyse / 5, 7 ou 10 ans, mais pas que pour le C
- Un double prélèvement, perçu, potentiellement comme contraignant
- Robustesse de la méthode MEPA, quand présence d'un horizon "H6"
- Du stock de COS de la parcelle au stock de COS estimé à l'échelle de l'exploitation



# Messages à retenir...

- Calcul des stocks à masse équivalente :
  - enjeux : c'est nécessaire !
  - principes : une méthode pertinente... et faisable !
- Choix du pattern dépend de vos objectifs :
  - représenter tout ou partie d'une parcelle
  - Suivre l'évolution du stock en se référant à un point bien identifié au sein de la parcelle
- Un pas de temps de 10 ans est nécessaire pour observer des variations de stocks significatives si les modifications des SdC sont modérées



# *Remerciements*

Ces travaux ont été conduits avec la collaboration précieuse de :

Fabien FERCHAUD et Guillaume VITTE, INRAE UMR Transfrontalière BioEcoAgro  
Jean-Christophe MOUNY, Agro-Transfert-RT  
Pascal BOIVIN et Cédric DELUZ, HEPIA – HES-SO, Genève  
Gaëtan JESTIN et Guillaume LECUYER, Earthworm



***Merci pour votre attention...***

***... et maintenant aussi pour vos questions et vos réactions ...***





# Références

- Chlebowski, F., Labreuche, J., Ferchaud, F., Mary, B., 2019. Calcul des stocks d'éléments du sol a masse equivalente (SEME). INRAE et Arvalis - Institut du végétal. R package version 0.7.9 29.
- Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J.-L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., Mary, B., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. Environ. Model. Softw. 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Deluz, M.C., 2017. Evaluation de la teneur en matière organique du sol d'une parcelle cultivée : quel échantillonnage pour quel objectif ? 136.
- Ellert, B.H., Bettany, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. Can. J. Soil Sci. 75, 529–538. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>
- Ferchaud, F., Vitte, G., Mary, B., 2016. Changes in soil carbon stocks under perennial and annual bioenergy crops. GCB Bioenergy 8, 290–306. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12249>
- Gifford, R.M., Roderick, M.L., 2003. Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression? Glob. Change Biol. 9, 1507–1514. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00677.x>
- Mouny, J.-C., Trochart, R., Clivot, H., Duparque, A., 2018. Evaluer les performances des systèmes de culture vis-à-vis du stockage de carbone et des émissions azotées. Colloque SoléBiom, Paris, 7 décembre 2018 [http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2019/01/8-Colloque-SOLeBIOM-AMG\\_Session3\\_Eval\\_SdC\\_vf.pdf](http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2019/01/8-Colloque-SOLeBIOM-AMG_Session3_Eval_SdC_vf.pdf)
- Pellerin, S. (ed ), Bamiere, L. (ed ), Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Darroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., Graux, A.-I., Guenet, B., Houot, S., Klumpp, K., Letort, E., Litrico, I., Martin, M., Menasseri, S., Meziere, D., Morvan, T., Mosnier, C., Estrade, J.R., Saint-André, L., Sierra, J., Thérond, O., Viaud, V., Grateau, R., Le Perchec, S., Savini, I., Réchauchère, O., 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude.
- Perrin, A.-S., Duparque, A., Mouny, J.-C., Clivot, H., Mary, B., Trochard, R., 2019. Evaluer l'évolution du statut organique des sols. Perspect. Agric. 19.
- von Haden, A.C. von, Yang, W.H., DeLucia, E.H., 2020. Soils' dirty little secret: Depth-based comparisons can be inadequate for quantifying changes in soil organic carbon and other mineral soil properties. Glob. Change Biol. 26, 3759–3770. <https://doi.org/10.1111/gcb.15124>
- Wendt, J.W., Hauser, S., 2013. An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. Eur. J. Soil Sci. 64, 58–65. <https://doi.org/10.1111/ejss.12002>